

充填材の熱伝導特性試験の検討

東京都市大学 学生会員○ 秋葉将太 正会員 末政直晃
 旭化成建材(株) 非会員 塚田義明 非会員 野田将司
 (財)ベターリビング 非会員 久世直哉

1. はじめに

近年、注目されている再生可能エネルギーの有効利用方法の一つに、地中熱ヒートポンプを利用した冷暖房システムがある。このシステムは、地盤の莫大な蓄熱能力を考慮し、夏期には地盤をヒートポンプの放熱源として、冬期には採熱源として利用することで、外気への人工排熱の排出を抑制することができ、ヒートアイランド現象ならびに地球温暖化の有効な対策として注目されている。

地中熱を利用するにあたり、地盤の熱伝導特性や地中熱交換器の性能を正確に把握することが重要となる。しかし、原位置でのサーマルレスポンス試験等の調査には、時間、費用等の面で困難な点が多い¹⁾。また、サーマルレスポンス試験では、採熱井全体の評価は出来るが、水向・水流等の影響も大きく、熱交換器として施工された充填材の熱伝導性能を分離することが困難である。また、充填材の種類によっても採熱井全体の熱伝導特性は大きく変化するため、効率よく採熱するためには充填材の熱伝導特性の把握が必要であると考えられる。

本研究では、地中熱交換器を地盤中に設置する際に用いられる充填材の熱伝導特性の把握のため、簡易恒温槽を用いた試験方法を考案した。本論では、室内において充填材の供試体での熱伝導特性の結果と、現場で実施したサーマルレスポンス試験結果、熱伝導解析との比較を行い、室内における試験方法の適用性について検討を行った。

2. 充填材によるサーマルレスポンス実験

サーマルレスポンス試験は地盤の有効熱伝導率、熱抵抗などの特性を把握する試験であり、地中熱交換器の設計に一般的に利用されている。方法としては、地中に設置した熱交換器に一定の熱量を与えながら循環水を循環させることで、得られた循環水の温度変化、流量、加熱電力等から理論式を用いて解析を行なうものが一般的である。サーマルレスポンス試験の模式図を図-1に示す。本試験では、ボアホール型地中熱交換器(BHX)を採用しており、このとき得られた熱物性値から、充填材の種類や施工方法によつての採熱状況の変化を評価する。サーマルレスポンス試験結果を表-1に示す。

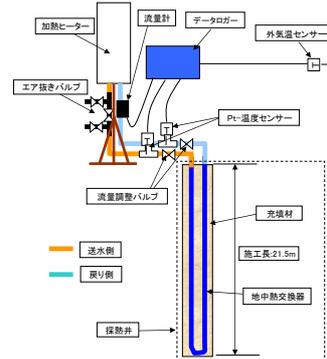


図-1 サーマルレスポンス試験の模式図

3. 熱伝導特性実験

茨城県美浦村大谷で行ったサーマルレスポンス試験で用いられた充填材において試験供試体を作製し、室内試験において熱伝導特性試験を行った。そして、既往の研究²⁾より確立されている簡易恒温槽を用いた熱伝導特性試験を行い、充填材における熱物性値を推定した。

3.1 試験装置の概要

簡易恒温槽の概要図を図-2に示す。試験装置は、供試体、ウレタンフォーム、真空断熱容器から構成され、供試体の寸法は、長さ175mm、外径100mmである。また、真空断熱容器の寸法は高さ186mm、内径125mmで、容器上部には断熱材として厚さ20mmのウレタンフォームを5枚重ねたものを設置した。また、試験体の周辺の熱環境を調整するため、試験体の外部に縦400mm、横490mm、高さ310mmの簡易恒温槽を設置している。ヒーターにより約43℃程度に設定した温水を温水槽内に張り、更に上部を断熱シートで覆った。恒温槽内の水温を一定に保つため、バスポンプを用いて水を循環させている。恒温槽内を温湿計により計測したところ、気温は35～40℃程度、湿度は60～70%であった。

表-1 サーマルレスポンス試験結果

場所	施工長 (m)	採熱管挿入深度 (m)	充填材	熱伝導率A (W/mK)	熱抵抗率Rb (mK/W)	備考
美浦村大谷	22.5	21.5	ベントナイト(GS)	1.46	0.92	W/B=100%

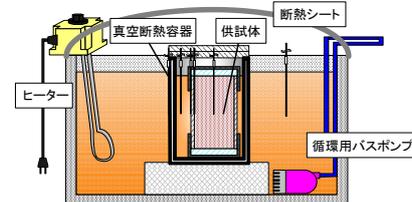


図-2 簡易恒温槽の概要

3.2 試験条件、試験方法

茨城県美浦村大谷でのサーマルレスポンス試験で用いられた配合を元に、配合条件を水ベントナ

Keywords : ヒートポンプ、地中熱利用、充填材

連絡先 : 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1 東京都市大学 TEL03-5707-2202 E-mail:g1181701@tcu.ac.jp

イト比W/B=1333%, 水セメント比W/C=100%として, 供試体を作製した. サーマルレスポンス試験ではベントナイト泥水による置換工法としているが, 室内試験用には自立した試験供試体とする必要があったためセメントミルク, ベントナイト泥水混合物として作製している. 温度測定にはK熱電対を使用し, 供試体作製時に上部より貫入し設置した. 測定点は, 供試体の中心から0cm, 2.5cm, 5.0cm, 熱源である温水, 恒温槽内水温, 気温の計6点とした. 試験方法は, まず, 作製した供試体の温度が室温程度で一定となるまで放置した. 次に, 恒温槽で温められている約43℃の温水を, 真空断熱容器内に830g移し, 40℃程度になるまで調整した. 供試体温度が一定となった後, 真空断熱容器を恒温槽内に設置し, 測定開始と同時に真空断熱容器内の熱源である温水に供試体を浸し, 上部に断熱材としてウレタンフォームを設置した. 最後に断熱シートで恒温槽上部を覆い, 熱源温水, 供試体等の温度が一定となるまで約2時間放置した.

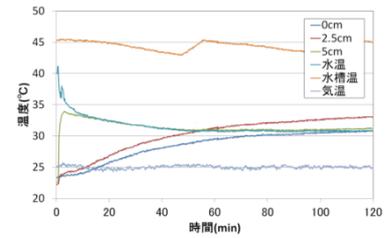


図-3 温度の経時変化

表-2 熱物性値の結果

		比熱	温度差	熱量	熱伝導率
		c [kcal/(kg·K)]	ΔT	Q [kcal]	λ [W/(mK)]
case1	水	1.00	10.4	8.63	0.60
	試料	0.78	7.4	8.63	0.66
case2	水	1.00	10.9	9.05	0.60
	試料	0.80	7.5	9.05	0.72

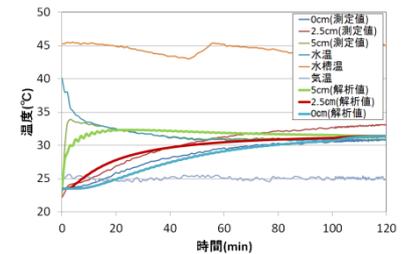


図-4 測定値と解析値の比較

3.3 試験結果

温度の経時変化を図-3に示す. 測定開始と同時に真空断熱容器内の約40℃の温水に供試体を浸すことで, 熱源の水温は低下し, 同時に供試体中心から5.0cm, 2.5cmの順で急激な温度上昇を示した後, 試料温度(0cm)の上昇を確認することができる. また, 熱平衡後の温度はほぼ水平に推移しており, 熱漏れ等無く, 温水と供試体との間で十分に熱交換が出来ていると考えられる. この熱平衡までの温度推移から熱伝導率λを以下の式より算出する.

$$\lambda = (W \cdot r) / (Af \cdot \Delta T) \tag{1}$$

ここで, 仕事率Wは, 熱容量Qを熱平衡に達するまでの時間tで除したものであり, rは試料の半径で, r=5.0[cm]である. Afは試料の周面積でAf=2πr·hより求めることが出来る. 試験の熱物性値の結果を表-2に示す. 算出された熱伝導率とサーマルレスポンス試験で得られた熱伝導率との比較を行うと, 原位置ではλ=1.46であったが, 室内試験では0.7程度となりローム地盤程度の値となった. この原因としては, 原位置での試験においての問題点として挙げられる水の流向・流速が大きく影響していることが考えられる. しかしながら, 熱収支が恒温槽内で定常化している状態を実現できたことで本試験方法の有用性を確認することが出来たため, 本試験方法の活用が十分考えられる. また, 本試験では, 熱交換が終了し平衡温度となる際, 0cmと2.5cmに温度差が生じることや, 熱伝導率にばらつきが生じる問題点があるため, 更なる改良が必要であると考えられる.

3.4 陽解法を用いた熱伝導方程式の差分計算

数値解析に用いた陽解法では, 時刻には前進差分を用い, 空間点で二次微分に対して二次中央差分を用いている. まず, 二次元熱伝導方程式を定義し, 陽解法で差分近似を行い式を算出する.

$$\partial u / \partial t = \kappa (\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2) \tag{2}$$

$$u^{n+1}_{i,j} = u^n_{i,j} + \kappa \Delta t / (\Delta x)^2 (u^n_{i+1,j} + u^n_{i-1,j} + u^n_{i,j+1} + u^n_{i,j-1} - 4u^n_{i,j}) \tag{3}$$

ここで, uは温度[℃], tは時間[s], κは熱拡散率[m²/s]を示している. (3)式に初期条件として, t=0の時に試料, 温水の初期温度, また, 境界条件として, 試料, 水の熱拡散率を与える. これを, 陽解法を用いて差分近似する. 差分近似式より求めた試料の温度変化と, 実験により得られた測定値がほぼ等しくなる時の熱拡散率κを算出した. また, 解析においてΔtは1min, Δxは0.55cmとした. 例として, 測定値と解析値を比較したものを図-4に示す. 結果から, 測定値に近い温度変化の挙動を再現できたと思われるが, 熱拡散率において測定値0.025[cm²/min], 解析値0.08[cm²/min]という結果となったため, 水流の影響を考慮する等, さらなる改良が必要であると考えられる.

4. まとめ

本論では, 簡易恒温槽を用いた熱伝導特性試験を行い充填材での熱物性値を推定し, 算出された熱伝導率をサーマルレスポンス試験, 熱伝導解析での値と比較を行った結果, 以下の知見を得た.

- ・ 充填材を試料とした室内試験において, 熱収支が恒温槽内で定常化している状態を実現できたことで, 本試験の活用が可能であると考えられる.
- ・ 熱伝導解析を行った結果, 測定値に近い温度挙動を示したが, さらなる改良が必要である.

《参考文献》 1) 舘野ら: 地中熱設計のためのヒーター埋設型原位置地盤熱伝導率分布探査法の検討, 日本地熱学会 平成20年度学術講演会講演要旨案 2) 片根ら: 地中熱利用のための地盤材料における熱伝導特性試験の検討, 地盤工学会 第46回地盤工学研究発表会, 2011.